CNPC2023 近球形核 ^{94}Nb 的高自旋态研究

李韵秋[1]，李聪博[1]，郑云[1]，李天晓[1]，吴晓光[1]，洪锐[1,2]，吴鸿毅[1]，郑敏[1]

赵子豪[1,3]，贺子阳[1]，李金泽[1]，李广顺[4]，郭成宇[5]，倪磊[5]，周振翔[5]

郭冰[1]，贺创业[1]，刘伏龙[1]，周小红[4]，柳敏良[4]，张玉虎[4]，王守宇[6]，王硕[6]

竺礼华[7]

（1 中国原子能科学研究院,北京 102413；

2 西华大学理学院，四川 成都 610039；

3 吉林大学物理学院，吉林 长春 130023；

4 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000；

5 北京大学物理学院，核物理与核技术国家重点实验室，北京 100091；

6 山东大学（威海）物理学院，山东 威海 264209；

7 北京航空航天大学物理科学与核能工程学院，北京 100191；）

摘要：通过重离子融合蒸发反应 ^{82}Se(^{18}O，p5n)^{94}Nb，布居了 ^{94}Nb 的高自旋态，实验中使用的 ^{18}O 束流由中国原子能科学研究院的 HI-13 串列加速器提供，束流能量为 82MeV 和 88MeV。在前人工作的基础上发现了 15 条新的γ跃迁并调整了部分能级的摆放位置，丰富并完善了 ^{94}Nb 的能级纲图，结合 DCO 比值和线极化测量，确认了部分能级的自旋和宇称。在质子 π($1f_{5/2}$，$2p_{3/2}$，$2p_{1/2}$，$1g_{9/2}$)和中子 ν($2p_{1/2}$，$1g_{9/2}$，$1g_{7/2}$，$2d_{5/2}$)空间下对 ^{94}Nb 新的能级结构与壳模型计算进行了比较和讨论。

关键词：高自旋态；在束谱学；原子核壳模型计算

中图分类号：O571.23　**文献标志码：A**　**doi：**

1　引言

A～90，N～50 核区的原子核大多数都具有球形或近球形结构，激发态以内禀单粒子激发为主[1][2][3][4][5]。丰中子核 ^{94}Nb（Z=41，N=53）相对 Z=38 子壳及 N=50 闭壳外有 3 个价质子和 3 个价中子，其能级要在较大的 π($f_{5/2}$，$p_{3/2}$，$p_{1/2}$，$g_{9/2}$)和 ν($d_{5/2}$,$s_{1/2}$，$d_{3/2}$，$g_{7/2}$，$h_{11/2}$)空间内用壳模型理论得到解释。通过本组之前对 Nb 同位素的研究发现：对于 N<=50 核素， 低位能级主要涉及质子在 π($p_{1/2}$，$g_{9/2}$)轨道的激发；激发能达到 4～5MeV 时 N=50 的中子满壳能够被打破，形成中子粒子-空穴[（$g_{9/2}$）$^{-1}$($d_{2/5}$)^{1}]组态核芯激发。对 N>50 的 Nb 同位素的中等自旋能级可由 Z=38 的核芯激发或 N=56 的核芯激发形成；对于这些核素，更高自旋的能级才涉及 N=50 的核芯激发(粒子-空穴激发) [2][3][4][5]。

在本实验之前，N.Ma˘rginean 等人通过 ^{19}F(^{82}Se, α3nγ)^{94}Nb 反应将 ^{94}Nb 的自旋（能量）推高到 18（

收稿日期： yyyy-mm-dd; **修改日期：** yyyy-mm-dd

基金项目： 国家自然科学基金资助项目(11975315,U1932209, U2167202, U2167201）

作者简介： 李韵秋(1999—)，女(汉)，黑龙江省,硕士研究生，粒子物理与原子核物理；E-mail:1727715916@qq.com

通信作者： 李聪博，E-mail: licb@ciae.ac.cn

6.5MeV）[1]，但宇称和部分自旋未知。因此，进一步扩展 ^{94}Nb 核的能级纲图，揭示其中子激发与质子激发的竞争和相互作用，是很有意义的。

本文将详细介绍 ^{94}Nb 高自旋态的实验研究结果, 在扩展其能级纲图的基础上, 通过壳模型计算以及对邻近核高自旋态能级结构的系统性分析, 探讨 ^{94}Nb 的中子质子激发机制。

2 实验和数据分析

本实验采用 ^{82}Se(^{18}O, p5n)^{94}Nb 反应来布居 ^{94}Nb 的高自旋态。实验在中国原子能科学研究院核物理国家实验室 HI-13 串列加速器的新一代伽马探测阵列上完成。探测器阵列由 23 套带 BGO 反康的高纯锗探测器和 5 个 Clover 探测器组成。实验使用的 ^{18}O 束流能量为 82MeV 和 88MeV，靶核是 ^{82}Se，靶厚度为 0.85mg/cm^2，使用厚度为 4.45mg/cm^2 的 Au 作为衬底。有效束流时间为 108 个小时，共探测到 1.2×10^{10} 个双重 γ-γ 符合事件。

经过能量刻度后，将实验数据离线反演为 γ-γ 二维对称矩阵，采用 Linux 下的 GSPware 软件对矩阵进行离线分析，根据与已知 γ 射线的符合关系结合强度判断，得到了如图 1 所示的 ^{94}Nb 能级纲图。N.Marginean 等人的文章中观察到的射线在此次实验中均有观察到，图中标红射线是在此次实验中新发现的射线，标蓝射线根据强度关系改变了其摆放位置。

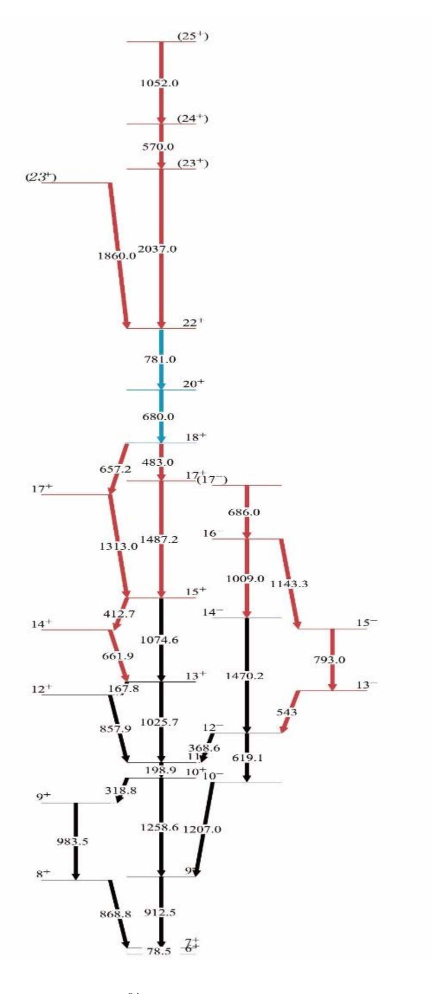


图 1： ^{94}Nb 能级纲图

原子核自旋取向一定时，其发射γ射线的概率与原子核自旋方向和发射γ射线方向的夹角有关。实验上可以通过测量 DCO 比值来提取有关跃迁 γ 射线多级性的信息，具体操作是将与束流方向成 150°探测器探测的 γ 射线能量放在 X 轴上，与束流方向成 90°方向探测器探测的 γ 射线能量放在 Y 轴上，生成一个非对称矩阵，然后通过开窗结果提取各 γ 射线的 DCO 比值，根据比值对 γ 射线的多极性做出判断。

DCO 比值的定义为：

$$R_{DCO} = \frac{I_{\gamma1}(\theta)/\varepsilon_{\gamma1}(\theta)\varepsilon_{\gamma2}(90°)}{I_{\gamma1}(90°)/\varepsilon_{\gamma1}(90°)\varepsilon_{\gamma2}(\theta)}$$

其中$I_{\gamma1}(\theta)$为在二维矩阵的 Y 轴上用$\gamma2$开窗得到的$\gamma1$计数，$I_{\gamma1}(90°)$为在 X 轴上用$\gamma2$开窗得到的$\gamma1$计数，$\varepsilon_{\gamma}(\theta)$为除 90°角外的所有探测器对 γ 射线的探测效率，$\varepsilon_{\gamma}(90°)$为 90°角的所有探测器对 γ 射线的探测效率。

图 2 给出了对属于 ^{94}Nb 的 γ 跃迁（912keV）进行开窗后得到的 DCO 结果，文献[1]中认为该跃迁是一个ΔI＝2 的跃迁，此次实验得到的 DCO 比值证实了 912keV 是一个ΔI＝2 的跃迁。图上可以看出 DCO 比值明显分为两组，DCO 比值位于 0.5 附近的跃迁ΔI＝1，位于 1.0 附近的跃迁ΔI＝2，DCO 值中可能会带入其他原子核的污染，导致结果偏离 0.5 和 1.0，这种情况需要计算多个与其有级联关系的γ射线的 DCO 比值，才能确定其跃迁极性。

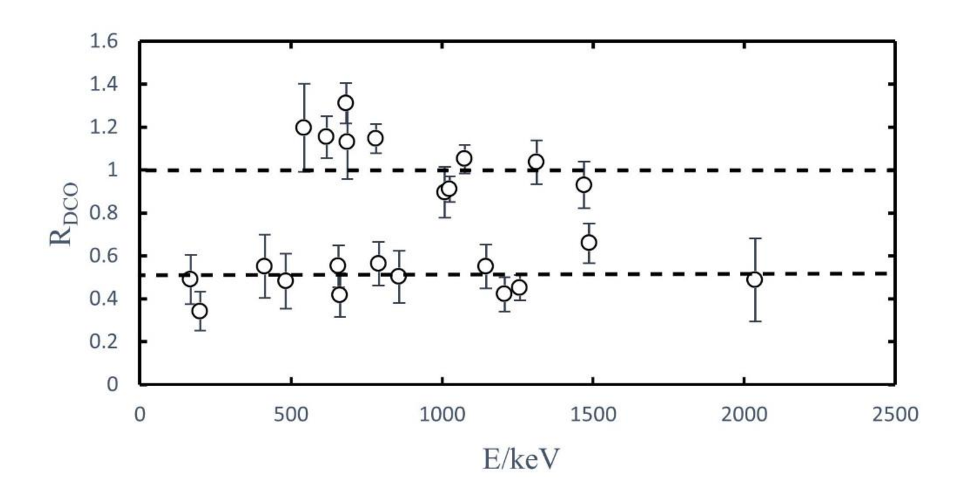


图 2：DCO 测量结果（对基态跃迁 912keV 进行开窗）

线极化测量可以确定 γ 射线的电磁跃迁特性，其原理是线性极化的 γ 射线方向分布取决于辐射的类型（磁跃迁/电跃迁），线极化度的表达式为：$P(\theta) = \frac{A(\theta)}{Q(\phi, E_\gamma)}$，其中$A(\theta) = \frac{a(E_\gamma)N_\perp - N_\parallel}{a(E_\gamma)N_\perp + N_\parallel}$，A(θ)为非对称度，$N_\parallel$和$N_\perp$分别是与反应平面平行和垂直的康普顿散射事件的计数，a 是 Clover 探测器对平行和垂直散射的 γ 射线探测效率的比值。Clover 探测器有四块晶体，如图 3 所示，实验时把 Clover 探测器放在与束流垂直的方向上，γ 射线入射到任一个晶体上时，将与之相邻的两个晶体在加和时间窗（80ns）内探测到的散射光

子认为是垂直和平行的康普顿事件。

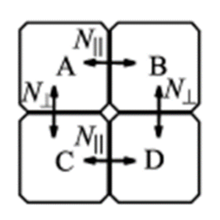


图 3：Clover 探测器示意图

实际上 Clover 探测器四块晶体的探测效率有一定差别，因此需要修正探测器在两个散射方向上的探测效率，使用本身无极化效应的放射源 ^{133}Ba 和 ^{152}Eu，将所有 Clover 探测器水平和垂直方向谱叠加后提取峰面积，根据公式$a = \frac{N_{\parallel}}{N_{\perp}}$，得到参数 a，用直线拟合 a 随能量的变化，拟合曲线如图 4 所示。可以看到 a 在 300～1400keV 范围内分布在 1.0 左右，且随着能量的升高呈现降低趋势。

拟合公式为：$a = 0.99517 - 2.66262E^{-5} \times E$。

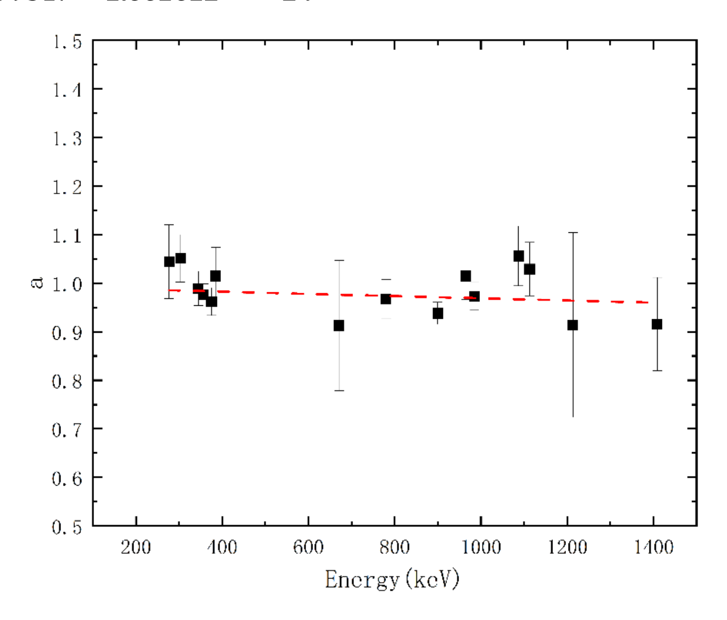


图 4：Clover 探测器极化效率 a 拟合曲线。

为筛选更干净的能谱，在进行线极化数据的离线处理时建立两个非对称矩阵，将 Clover 探测器平行和垂直方向的康普顿符合事件能谱分别放在两个矩阵的 X 轴，将高纯锗探测器探测到的能谱放在 Y 轴，当高纯锗探测器和 Clover 探测器的两路在符合时间窗内同时探测到入射事件时，才认为它是一个符合事件，使用的符合时间窗是 80ns。由于单一能量的开窗谱计数较少，将数个与目标能量有级联关系且污染较少的开窗谱进行叠加。

图 5 给出了对 199,1025,1075,1470,483,681keV 进行开窗后叠加的部分结果，图中可以看到 912keV 的水平方向计数明显小于垂直方向计数，结合之前的 DCO 测量可判断 912keV 是一个电四极跃迁。以此类推可得到其他 γ 跃迁的电磁特性。

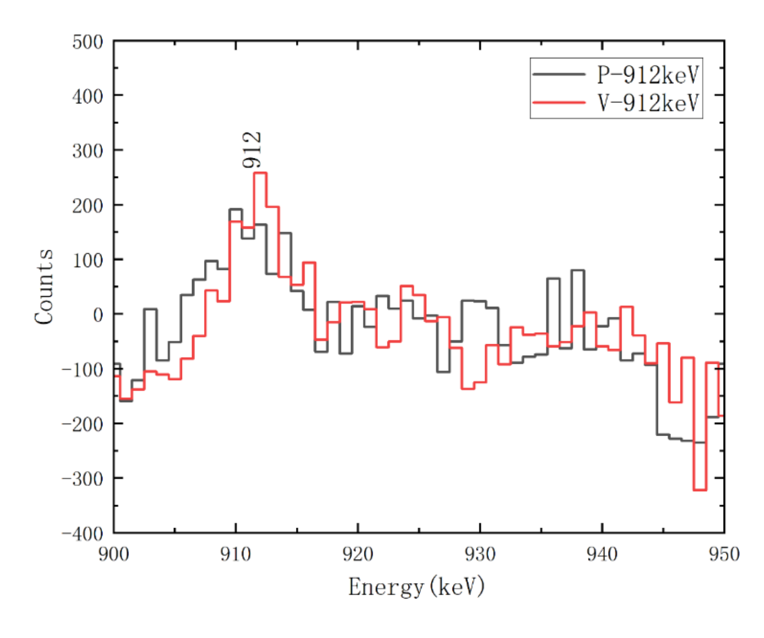


图 5：对 199,1025,1075,1470,483,681kev 开窗后的叠加结果（截取 912keV 部分）

3 讨论

考虑到 ^{94}Nb 的同位素 ^{90,} ^{92}Nb，以及邻核 $^{94-96}$Tc，均使用壳模型计算获得了与实验较为符合的结果；且 ^{94}Nb 的质子数为 41，中子数为 53，是近球形核。在计算 ^{94}Nb 的能级时使用壳模型，采用 NUSHELLX 进行计算。在截断方式上，目前尝试的截断方式为$(f_{5/2})^{4-6}$,$(p_{3/2})^{2-4}$,$(p_{1/2})^{0-2}$,$(g_{9/2})^{1-5}$；v$(f_{5/2})^{6-6}$，$(p_{3/2})^{4-4}$，$(p_{1/2})^{2-2}$，$(g_{9/2})^{9-10}$，$(g_{7/2})^{0-2}$，$(d_{5/2})^{1-4}$，$(d_{3/2})^{0-2}$，$(s_{1/2})^{0-2}$ 采用的核芯为 ^{66}Ni，相互作用势为 GWBXG。各能态的计算结果和实验结果的比较如图 6，7 所示。

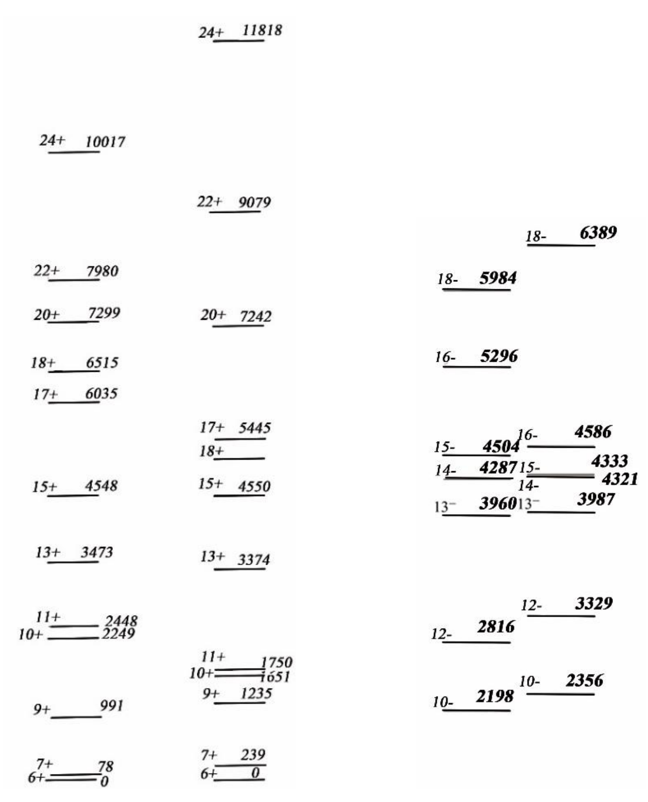


图 6：正宇称实验结果（左）与计算结果（右）　　图 7： 负宇称实验结果（左）与计算结果（右）

正宇称的计算结果显示在 6^+到 7^+的组态涉及质子对激发，即一对 $p_{1/2}$ 轨道上的质子激发到 $g_{9/2}$ 轨道上；13^+和 15^+的组态涉及到一个 $f_{5/2}$ 轨道上的质子激发到 $p_{1/2}$ 轨道上；将 17^+和 18^+的组态指定为 $\pi[(2p_{1/2})^0 (1g_{9/2})^3]\otimes\nu(1g_{7/2})^1(2d_{5/2})^1(3s_{1/2})^1$；计算结果表明在正宇称中 26^+的组态涉及中子核芯激发，即一个 $g_{9/2}$ 轨道上的中子跨越 N=50 的壳层激发到 $g_{7/2}$ 轨道上，可惜的是本次实验未观测到。

负宇称的计算结果显示 10^-态可表示为 $g_{9/2}$ 轨道的未配对质子耦合上 $d_{5/2}$ 的未配对中子；12^-到 16^-态涉及一个质子从 $p_{1/2}$ 轨道激发到 $g_{9/2}$ 轨道；18^-态涉及到 $f_{5/2}$ 轨道的一个质子激发到 $p_{1/2}$ 轨道；截止至 18^-未发现中子核芯激发。

图中可以看出，计算结果的 10^+和 11^+态与实验结果相差较大，计算能级能量偏低；且高自旋态（24^+,18^-）的计算结果与实验结果相差较大。造成这一现象的原因可能是模型采用的截断空间过小，遗漏了占主导地位的组态。

4　结论

本工作利用重离子熔合蒸发反应 ^{82}Se(^{18}O, p5n)^{94}Nb 布居了丰中子核 ^{94}Nb 的高自旋态，扩展了 Nb 核区的原子核结构信息；结合 DCO 和线极化测量，确定了部分能级的宇称和自旋；在前人基础上新发现了 15 条 γ 跃迁并根据强度修正了两条射线的摆放顺序。使用壳模型对 ^{94}Nb 的能级和组态进行了计算，发现在目前使用的截断空间内计算结果与实验结果有一定差距，计划后续修改截断空间并换用更大的组态空间，加入 $h_{11/2}$ 轨道进行再次计算。

本工作是在中国原子能科学研究院串列加速器上完成的，感谢加速器运行组为本实验提供了稳定的束流。

参考文献（References）

[1] N Mărginean, D Bucurescu, Ghe Că-ta-Danil, *et al*. High-spin states in the ^{94}Nb nucleus [j]. Phys Rev C, 2000, 62: 034309.doi: 10.1103/PhysRevC.62.034309

[2] Cui X Z, Zhu L H, Wu X G, *et al*. High-spin states and shell structure of the odd-odd nucleus ^{90}Nb [j]. Phys Rev C,2005,72: 044322. doi: 10.1103/PhysRevC.72.044322

[3] Luo P W, Wu X G, Sun H B, *et al*. High-spin level structure of the semi-magic nucleus ^{91}Nb [j]. Phys Rev C,2014, 89, 034318. doi: 10.1103/PhysRevC.89.034318

[4] W Y Heng, L J Bin, L P Wei, *et al*. High-Spin States in the Odd-Odd Nucleus ^{92}Nb [j]. CHIN PHYS LETT, 2014, 34, 042102.doi: 10.1088/0256-307X/31/4/042102

[5] Wu Y H, Lu J B, Ren Zhen, *et al*. Level structure of the ^{93}Nb nucleus and systematics of features in neighboring nuclei [j]. Phys Rev C, 2022,105: 034344. doi: /10.1103/PhysRevC.105.034344

[6] K Starosta, T Morek, Ch. Droste, *et al*. Experimental test of the polarization direction correlation method (PDCO) [j]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 1999, 423: 16 – 26. doi: /10.1016/S0168-9002(98)01220-0

[7] 方永得，张玉虎，周小红等. Clover 探测器的极化测量[j]. 高能物理与核物理，2007，31(10)：938—941.

[8] 崔兴柱，竺礼华，吴晓光等. ^{90}Nb 和 ^{91}Nb 的高自旋态结构[j]. 高能物理与核物理，2004，28：27—30.

High-spin states in near stable nucleus ^{94}Nb

LI Yun-qiu [1], LI Cong-bo[1], ZHENG Yun[1], LI Tian-xiao[1], WU Xiao-guang[1], HONG Rui[1,2], WU Hong-yi[1], ZHENG Min[1]

ZHAO Zi-hao[1, 3], HE Zi-yang[1], LI Jin-ze[1], LI Guang-shun[4], GUO Cheng-yu[5], NI Lei[5], ZHOU Zhen-xiang[5], GUO Bing[1]

HE Chuang-ye[1], LIU Fu-long[1], ZHOU Xiao-hong[3], LIU Min-liang[3], ZHANG Yu-hu[3], WANG Shou-yu[6], WANG Shuo[6]

ZHU Li-hua[7]

(1 China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413;

2 Department of Science, Xihua University, Chengdu Sichuan, 610039;

3 Department of Physics, Jilin University, Changchun, Jilin 130023;

4 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000;

5 State Key Laboratory of Nuclear Physics and Technology, Department of Physics, Peking University, Beijing 100091;

6 Department of Physics, Shandong University (Weihai), Weihai Shandong 264209;

7 Physical and Nuclear Energy and Engineering, Beihang University, Beijing 100191;)

Abstract: High spin states of ^{94}Nb have been studied with the ^{82}Se(^{18}O, p5n)^{94}Nb fusion evaporation reaction at an incident beam energy of 82 and 88 MeV. The level scheme of ^{94}Nb has been modified and extended with 15 new γ rays. Based on γ-γ coincidence relationships, DCO ratios and linear polarization measurements, the new level structures in ^{94}Nb have been interpreted in terms of the shell model calculations performed in the configuration space $\pi(1f_{5/2}, 2p_{3/2}, 2p_{1/2}, 1g_{9/2})$ for the protons and $\nu(2p_{1/2}, 1g_{9/2}, 1g_{7/2}, 2d_{5/2})$ for the neutrons.

Key words: high spin state; in-beam γ-ray spectroscopy; nuclear shell model

---

Received date: yyyy-mm-dd; **Revised date:** yyyy-mm-dd

Foundation item: National Natural Science Fundation of China(11975315,U1932209, U2167202, U2167201)

† **Corresponding author**: LI Congbo, E-mail: licb@ciae.ac.cn